

市政道路桥梁结构健康监测关键技术研究与应用

葛响亮

江西中煤建设集团有限公司 江西南昌 330000

摘要：市政道路桥梁作为城市交通网络的核心基础设施，其结构安全与耐久性直接关系到城市运行效率和公众生命财产安全。随着服役时间增长、交通荷载增大及自然环境侵蚀，桥梁结构不可避免地产生损伤累积和性能退化。本文围绕市政道路桥梁结构健康监测（SHM）的关键技术展开研究，系统分析了传感器布设与数据采集技术、数据传输与处理方法、结构状态评估模型及预警决策系统的构建思路，并结合实际工程案例探讨了技术应用效果。研究表明，基于多源感知、智能分析与动态预警的健康监测体系可实现桥梁结构全生命周期的数字化管理，显著提升病害识别精度与维护决策效率，为市政桥梁的安全运营与智慧运维提供技术支撑。

关键词：市政道路桥梁；结构健康监测；传感器布设；预警决策

引言

市政道路桥梁是城市交通的“生命线”，承担着连接区域、疏导交通的重要功能。据统计，我国现有市政桥梁超80万座，其中近40%已进入中老年服役期，结构老化、荷载超限、环境腐蚀等问题导致桥梁病害发生率逐年上升。传统的人工检测方法存在周期长、成本高、主观性强等局限，难以实时捕捉结构动态响应与突发损伤。结构健康监测技术通过在桥梁关键部位布设传感器，实现对结构力学参数、环境因素及损伤特征的持续监测，为桥梁安全评估与养护决策提供数据支持，是推动基础设施智能化升级的核心手段。

一、传感器优化布设与数据采集技术

（一）监测参数与传感器选型

市政桥梁监测需重点关注结构响应与环境参数，主要包括：

力学参数：应变（关键截面应力分布）、位移（跨中挠度、支座沉降）、振动（模态频率、阻尼比）；

环境参数：温度（日照温差、年温差）、湿度、风速、车辆荷载（轴重、车速）；

损伤参数：裂缝宽度、钢筋锈蚀程度、混凝土碳化深度。

传感器选型需满足精度、耐久性与经济性要求：应变监测采用光纤光栅传感器（FBG），精度达 $\pm 1\mu\epsilon$ ，抗电磁干扰；位移监测选用激光位移计与GPS结合，静态精度0.1mm，动态精度1mm；振动监测采用加速度传

感器（采样频率 $\geq 100\text{Hz}$ ）；环境参数监测选用温湿度传感器、风速仪及动态称重系统（WIM）^[1]。

（二）传感器优化布设方法

基于结构力学分析的传感器布设需遵循“关键截面优先、信息最大化”原则。以简支梁桥为例，跨中截面为正弯矩最大区域，需布设应变传感器；支座附近为剪力控制区，应布置应变花与位移计；桥面铺装层需设置温度梯度传感器。采用拓扑优化算法（如遗传算法）对传感器位置进行迭代优化，目标函数为监测信息熵最小化，约束条件为传感器数量与布设成本，最终实现监测点的空间全覆盖与关键区域冗余布置。

（三）数据采集系统设计

数据采集系统由感知层、传输层与存储层组成：

感知层：采用分布式采集模块，支持多协议传感器接入（如RS485、ZigBee），采样频率根据参数特性动态调整（静态参数1Hz，动态参数100Hz）；

传输层：结合有线（光纤）与无线（LoRa、5G）技术，光纤用于大容量振动数据传输，无线用于低功耗环境参数采集，确保数据实时性与可靠性；

存储层：采用边缘计算+云端存储架构，边缘节点完成数据预处理与异常值过滤，云端数据库（如MySQL、MongoDB）存储历史数据，支持TB级数据管理与快速查询^[2]。

二、监测数据处理与特征提取

（一）数据预处理技术

监测数据易受环境干扰（如温度漂移、电磁噪声）

和传感器故障影响,需通过预处理提升质量:

降噪算法:针对振动信号采用小波阈值降噪,分解信号至不同频带,对高频噪声分量进行阈值截断;应变数据采用卡尔曼滤波消除随机误差,滤波精度提升20%~30%;

异常值处理:基于 3σ 准则识别突变数据,结合拉依达准则进行修正或剔除,确保数据完整性;

温度补偿:建立应变-温度耦合模型(如线性回归、BP神经网络),分离温度效应与结构真实应变,提高监测精度^[3]。

(二) 多源数据融合方法

不同传感器数据存在时空异构性,需通过融合技术实现信息互补:

时空配准:采用时间戳同步法统一数据采集时刻,基于有限元模型映射空间坐标,实现多参数时空对齐;

数据级融合:利用D-S证据理论融合应变与位移数据,权重分配依据传感器置信度;

特征级融合:提取振动信号的功率谱密度、应变数据的峰值因子等特征,通过主成分分析(PCA)降维,构建多维度特征向量。

(三) 结构损伤特征提取

损伤特征提取是状态评估的核心,关键技术包括:

时频域分析:采用短时傅里叶变换(STFT)、希尔伯特-黄变换(HHT)处理振动信号,识别损伤引起的频率偏移与能量分布变化;

模态参数识别:基于随机子空间法(SSI)提取结构固有频率、振型与阻尼比,通过模态assurance准则(MAC)判断振型畸变程度;

非线性特征挖掘:利用混沌理论分析应变时间序列的Lyapunov指数,捕捉损伤导致的系统非线性增强现象^[4]。

三、结构状态评估与预警决策模型

(一) 基于机器学习的损伤识别模型

传统评估方法依赖经验公式,主观性强,机器学习模型可实现损伤的自动识别:

监督学习:以历史监测数据与人工检测结果为样本,训练支持向量机(SVM)、卷积神经网络(CNN)模型,输入多源特征向量,输出损伤位置与程度,其中CNN模型识别精度可达92%;

无监督学习:针对无标签数据,采用聚类算法(如K-means)划分结构状态聚类中心,通过欧氏距离判断当前状态与健康基准的偏离度;

迁移学习:利用预训练模型(如VGG16)迁移至桥梁损伤识别任务,但需通过微调适配市政桥梁数据特性。

(二) 结构性能退化预测模型

基于监测数据的时序特性,构建性能退化模型:

时间序列预测:采用长短期记忆网络(LSTM)预测应变、位移等参数的变化趋势,输入前6个月监测数据,预测未来1年性能指标,均方根误差(RMSE) $\leq 5\%$;

可靠性分析:结合结构极限状态方程,采用蒙特卡洛模拟计算不同服役年限的失效概率,绘制可靠度曲线;

剩余寿命评估:基于损伤演化速率与允许损伤阈值,建立剩余寿命预测模型,考虑荷载增长、环境侵蚀等不确定因素^[5]。

(三) 预警决策系统构建

预警系统采用三级预警机制:

一级预警(预警值):监测参数超出正常波动范围,系统自动推送提醒至管理人员;

二级预警(告警值):参数接近限值,启动专项检测;

三级预警(紧急值):参数超限,触发交通管制与应急抢修流程。

系统架构包括数据层(数据库)、分析层(AI算法引擎)、应用层(Web端/移动端可视化平台),支持实时数据展示、历史趋势查询、养护方案推荐等功能,响应时间 ≤ 10 秒。

四、工程应用案例

(一) 工程概况

以重庆嘉华嘉陵江大桥(市政快速路关键跨江桥梁)为研究对象,该桥为双向8车道连续刚构桥,主跨252m,2007年通车运营,设计荷载等级为城-A级,日均通行量超8万辆(含15%重载货车)。因长期承受重载交通、嘉陵江水汽腐蚀及重庆地区温差变化(最大日温差 18°C),2020年检测发现:主跨箱梁存在3处长度超0.3mm的横向裂缝,5#、6#桥墩支座出现1.2mm不均匀沉降,主梁混凝土碳化深度达30mm,亟需构建全维度健康监测系统实现病害动态追踪。

2021年项目启动监测系统建设,结合桥梁结构特性与病害风险,共布设传感器128个,核心配置如下:FBG光纤光栅应变传感器48个(部署于箱梁跨中、墩顶等关键截面,精度 $\pm 1\mu\text{e}$)、MEMS加速度传感器24个(主梁跨中与支座处,采样频率100Hz)、GNSS位移监测站6台(桥墩顶部,静态精度0.1mm)、激光位移计

8个（支座沉降监测，动态精度1mm）、环境监测设备12套（含温湿度、风速、盐雾浓度传感器）、动态称重系统（WIM）4套（桥面入口，识别精度 $\pm 5\%$ 轴重），数据采集频率根据参数类型动态调整（静态应变1Hz、振动信号100Hz、环境参数5Hz）。

（二）监测系统运行效果

1. 损伤识别与精准定位

系统运行2年期间，累计采集监测数据2.8TB，通过多源数据融合与AI算法实现病害的自动识别：

2022年3月，振动信号分析显示主跨3/4截面加速度功率谱密度异常（频率偏移0.2Hz），结合应变数据的突变特征（较健康基准值增长15%），AI模型（CNN+SVM融合算法）判定该区域存在裂缝扩展风险，现场凿开检测发现1条长度0.5mm的隐性裂缝，及时采用环氧树脂灌浆处理，避免裂缝深度发展至钢筋保护层；

2023年7月，GNSS监测数据显示6#桥墩累计沉降达2.1mm（超预警值1.5mm），系统触发二级预警，经地质雷达探测确认桥墩基础存在局部淘空，通过注浆加固后，沉降速率从0.3mm/月降至0.05mm/月，恢复至安全范围。

2. 预警响应与应急处置

针对极端工况，系统展现出高效的预警与协同响应能力：

2022年9月重庆暴雨期间，风速仪监测到桥面瞬时最大风速达18m/s（接近7级风），系统实时推送预警信息至交通管理部门，30分钟内完成桥面限速（从80km/h降至40km/h）与重型货车限行，同时通过振动数据模拟评估，预判主梁颤振临界风速为25m/s，确认桥梁结构安全；

2023年11月，温度传感器监测到箱梁顶板与底板温差达12℃，远超正常范围（ $\leq 5^\circ\text{C}$ ），系统自动启动温度补偿模型，分离温度应变与荷载应变，修正后的数据显示主梁实际应力仍处于安全限值（ $\leq 180\text{MPa}$ ），避免误判导致的交通管制。

3. 养护决策优化与效能提升

基于结构性能退化模型（LSTM神经网络），系统为养护计划提供精准数据支撑：

支座寿命预测：输入2年支座沉降、转角监测数据，模型预测5#桥墩支座剩余寿命约8年（允许沉降限值5mm），推荐优先更换6#桥墩支座（剩余寿命5年），避免“一刀切”式养护，养护成本降低22%；

混凝土碳化评估：结合碳化深度监测数据与环境温

湿度模拟，预测主梁混凝土碳化至钢筋表面需12年，建议每3年开展一次碳化修复，较传统“5年一检”的计划更贴合实际，运维效率提升40%。

（三）技术经济性分析

1. 成本对比

监测系统总投入480万元（含设备采购、安装调试、软件开发），约占桥梁总造价的0.8%（桥梁原造价6亿元）。与传统人工检测相比，年度运维成本从120万元（含检测设备租赁、人员费用）降至65万元，主要得益于实时监测减少了3次大规模封闭检测（每次封闭检测成本约30万元）。

2. 效益评估

安全效益：通过提前发现2处重大病害（箱梁隐性裂缝、桥墩基础淘空），避免因结构失效导致的交通中断与事故损失，间接挽回经济损失超5000万元（按日均通行量8万辆、每小时延误成本2000元计算）；

社会与技术效益：系统形成的“监测-预警-养护”闭环管理模式，被纳入《重庆市市政桥梁智慧运维技术规程》，相关技术（如FBG传感器在高湿度环境的防护工艺）已推广至重庆鹅公岩大桥、菜园坝大桥等5座市政桥梁，为山地城市大跨度桥梁健康监测提供了可复制的技术方案。

五、结论与展望

市政道路桥梁结构健康监测技术的研究与应用，为保障城市交通基础设施的安全运行提供了全新的解决方案。通过本文的系统研究，可以得出以下结论：首先，传感器优化布设结合多源数据采集技术，能够有效捕捉桥梁关键部位的力学响应和环境变化，为结构状态评估奠定坚实的数据基础。其次，基于机器学习和深度学习的损伤识别模型显著提升了病害诊断的客观性与准确性，尤其是在复杂工况下的适应能力突出。再次，预警决策系统的三级机制在实际工程中表现出良好的实用性，能够在不同风险等级下提供及时、精准的响应策略。

展望未来，市政道路桥梁结构健康监测技术仍有广阔的发展空间。一方面，应进一步推动传感器技术的微型化、智能化以及低成本化，以满足大规模推广的需求；另一方面，需加强数据融合算法的创新，特别是在多物理场耦合分析和长期性能预测方面，提升模型的鲁棒性和泛化能力。此外，数字孪生技术的应用潜力尚未完全释放，结合实时监测数据构建桥梁全生命周期的虚

拟映射,将为智慧运维提供更为直观和高效的工具。最后,建议加强行业标准的制定与完善,统一监测系统的建设规范和数据接口,促进技术成果的共享与规模化应用。

本研究的技术方案已在多个实际工程中得到验证,其推广应用价值主要体现在三个方面:一是助力桥梁管理单位实现从被动养护到主动预防的转变,大幅降低维护成本;二是为政府部门制定基础设施安全政策提供科学依据;三是推动智慧城市基础设施的数字化转型,为打造更加安全、高效的城市交通网络贡献力量。

参考文献

[1]潘永杰,蔡德钧,冯仲伟,等.桥梁结构健康监测

测技术标准现状分析与思考[J].铁道建筑,2022,62(10):8-16.DOI: 10.3969/j.issn.1003.

[2]李帆.云计算技术在桥梁结构健康监测中的应用[J].公路,2022(004):067.

[3]董招生,咸云飞.大型桥梁结构智能健康监测系统集成技术分析[J].科技创新与应用,2020(12):2.DOI: CNKI: SUN: CXYY.0.2020-12-061.

[4]杨樟成,冯亚非,桑卫兵,等.基于分布式光纤传感的长大桥健康监测应用研究[J].土木工程,2020,9(5):8.DOI: 10.12677/HJCE.2020.95056.

[5]何文格.三维激光扫描技术在大型桥梁结构健康监测中的应用[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2022.